

Оценка пропускной способности при использовании спектрально эффективных методов модуляции сигналов

Вячеслав Фёдоров, Владимир Филатов (Москва)

На сегодняшний день современные многоканальные системы связи и управления широко используются. Это спутниковые системы связи и управления, сотовые сети, сети беспроводного доступа, профессиональные сети связи (подвижные и стационарные), сети связи специального назначения. Все перечисленные системы имеют ограничение частотного ресурса. Следовательно, появляется необходимость увеличения их пропускной способности.

От цифровой системы связи требуется высокая скорость передачи сообщений, измеряемая в количестве передаваемых двоичных символов за единицу времени (битовая скорость), узкая частотная полоса, занимаемая сигналом, малая вероятность ошибки (символьной p_s , битовой p_b) при низкой, насколько это возможно, мощности сигнала. Эти требования должны быть реализованы в совокупности с возможностью простой аппаратной реализации. Перечисленные требования к системе противоречивы. Очевидно, что для повышения скорости передачи следует расширять частотную полосу канала, а для уменьшения вероятности ошибок – увеличивать мощность сигнала. Спектральная эффективность R_b / F максимальна в системах с амплитудно-фазовой модуляцией. Символ длительности T_s переносит $\log_2 M$ бит информации, где M – число символов алфавита. Битовая скорость $R_b = (\log_2 M) / T_s$. Минимальная ширина полосы пропускания канала (F), необходимая для передачи данных в основной полосе частот без межсимвольных искажений со скоростью $R_s = 1 / T_s$ символов в секунду, равна $1 / (2T_s)$ Гц (в два раза меньше частоты опросов детектора).

Таким образом, ширина спектра полосовой амплитудно-фазовой манипуляции удваивается, а необходимая полоса пропускания канала становится равной $1 / T_s$. Частотная полоса системы с M -арной частотной манипуляцией $F = M / T_s$. Следовательно, спектральная эффективность систем с амплитудно-фазовой и частотной манипуляцией рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} R_b / F &= \log_2 M \text{ (QAM) и} \\ R_b / F &= (\log_2 M) / M \text{ (FSK)}. \end{aligned} \quad (1)$$

С целью повышения спектральной эффективности в финитном спектре используются многоосновные виды модуляции. Согласно работе Б. Скляра [1], наиболее эффективными по данному показателю являются M -арная фазовая модуляция (M -PSK) и M -арная квадратурная амплитудно-фазовая модуляция (M -QAM). На рисунке 1 отмечены точки, представляющие значения показателей E_b / N_0 и R_b / F для M -арной амплитудно-фазовой манипуляции с когерентным детектированием (знак о, $M = 2, 4, 16, 64$) и частотной манипуляции с некогерентным детектированием (знак x, $M = 2, 4, 8, 16$). При этом вероятность битовой ошибки без помехоустойчивого кодирования составляет не более 10^{-5} . Предполагается, что несущее колебание модулируется прямоугольными импульсами.

С увеличением параметра M помехоустойчивость системы с частотной манипуляцией возрастает, а системы с амплитудно-фазовой манипуляцией – уменьшается (см. рис. 1). В системе с амплитудно-фазовой манипуляцией с ростом M уменьшается расстояние

между сигналами. Поэтому увеличивается вероятность ошибки, определяемой и как функция S / N , и как функция E_b / N_0 . Вероятность ошибки в системах с двухбитным и однобитным символом (4ФМ и 2ФМ) одинакова, поскольку система 4ФМ – это две системы 2ФМ, работающие одновременно и независимо друг от друга на ортогональных составляющих. Спектральная эффективность системы 4ФМ в два раза выше, чем у системы 2ФМ. Спектральная эффективность систем с двухбитным и однобитным частотным модулированием сигнала (4ЧМ и 2ЧМ) одинакова: $(\log_2 2) / 2 = (\log_2 4) / 4$. Таким образом, заданные скорость передачи данных и помехоустойчивость можно обеспечить при ограниченной частотной полосе. Сделать это можно за счёт увеличения мощности сигнала с амплитудно-фазовой манипуляцией, а при ограниченной мощности – за счёт расширения частотной полосы сигнала с частотной манипуляцией.

Применяя амплитудно-фазовую манипуляцию с большими значениями параметра M , удаётся передавать данные с высокой скоростью по узкополосной проводной линии связи, поскольку на этой линии отношение сигнал/шум, как правило, велико.

Первый способ подразумевает применение временного, частотного или кодового уплотнения (см. рис. 2). Наилучшим способом применения кодового уплотнения является использование ортогональных сигналов. В таком случае применение M -арной частотной модуляции представляется крайне затруднительным. Наиболее целесообразным в таком случае представляется использование M -арной квадратурной амплитудно-фазовой модуляции (M-QAM) или гибридной M -арной квадратурной амплитудно-фазовой (инверсной модуляции) M-QAPM. При этом сохраняется ортогональность и увеличивается эффективность использования спектра:

$$\begin{aligned} P_{\text{ош}} &= 1 - P_{\text{нрА}}(X / \varphi) \times \\ &\times \left[\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M P_{\text{нрА}}(\varphi_i) + \frac{1}{2} (P_{\text{нрМ}}(X / \varphi) + 1) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

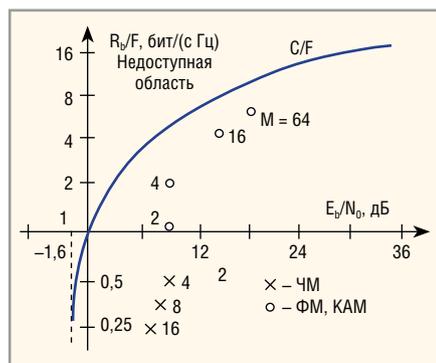


Рис. 1. Сравнение М-ЧМ, М-ФМ и М-КАМ

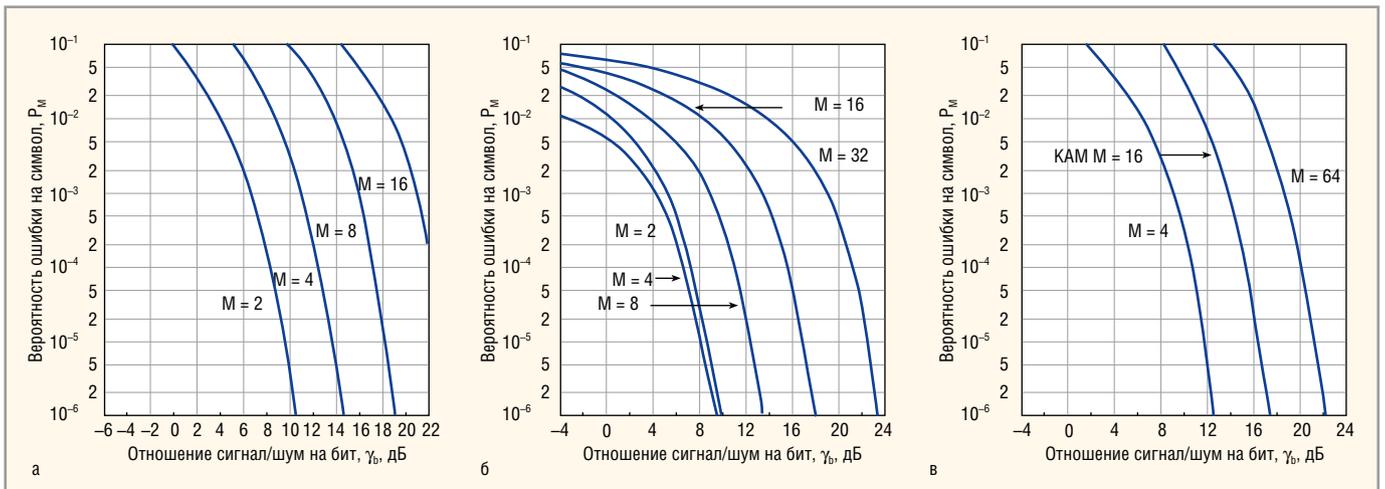


Рис. 2. Вероятность ошибки на символ при [2]: а – М-АМ; б – М-ФМ; в – М-КАМ

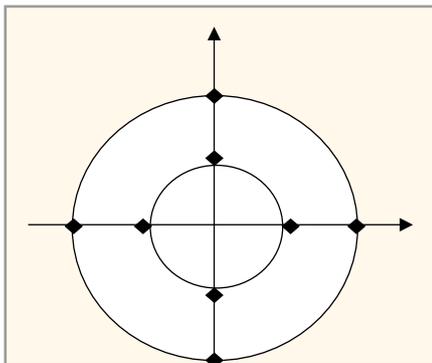


Рис. 3. Двухуровневая квадратурная амплитудно-инверсная модуляция (2-QAPM)

На рисунке 3 можно наблюдать, что спектральная и энергетическая эффективность рассмотренных систем далека до теоретического предела. Чтобы к нему приблизиться необходимо совершенствовать методы модуляции и кодирования.

Рассмотрим другой вид модуляции – квадратурную амплитудно-фазовую (инверсную) модуляцию. Данный вид модуляции позволяет передавать информацию по синфазной и квадратурной

Сравнительная характеристика энергетических затрат на бит информации при различных видах модуляции (значения для М-PSK и М-QAM [2])

$P_{\text{ош}}/\text{бит}$	Бит/символ	М-PSK	М-QAM	М-QAPM
10^{-3}	8			17,1
	6		15	12,24
	4	15	11	7,64
10^{-4}	8			18,69
	6		17	13,84
	4	16	12,7	9,27
10^{-5}	8			19,98
	6		18	15,14
	4	18	14,3	10,49
10^{-6}	8			21,17
	6		21,8	15,97
	4	19	14,5	11,58

составляющим, что повышает спектральную эффективность полосы частот.

Как следует из таблицы 1, наиболее приемлемым из проанализированных видов модуляции является М-арный квадратурный амплитудно-фазовый демодулятор.

Выводы

Предложенный способ многоуровневой амплитудно-инверсной модуляции сигналов (КАИМ), по сравнению с КАМ,

характеризуется существенно большей энергетической эффективностью при их одинаковой спектральной эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Склэр Б. Цифровая связь. М. Издательский дом Вильямс. 2003. С. 1104.
2. Дж. Проксис. Цифровая связь. Пер. с англ. М. Радио и связь. 2000. С. 800.
3. Тамаси У. Электронные системы связи. М. Техносфера. 2007. С. 1360.



Новости мира News of the World Новости мира

Qualcomm грозит штраф за ущемление конкурентов

Европейские антимонопольные органы обвиняют Qualcomm в попытках помешать развитию конкуренции на рынке мобильных процессоров. Теперь компанию могут оштрафовать на миллиарды долларов.

Как пишет газета The Wall Street Journal со ссылкой на заявление Европейской Комиссии (ЕК), сделанное 8 декабря, Qualcomm платила одному из своих крупных клиентов (его имя не называется) за то, чтобы он не использовал в своих устрой-

ствах чипы других компаний. Кроме того, Qualcomm продавала микросхемы по ценам ниже себестоимости, чтобы вытеснить конкурирующую Icera с рынка.

В связи с выдвинутыми обвинениями Qualcomm получила от ЕК два так называемых уведомления о претензиях, на которые компании устно или письменно необходимо ответить в течение 3–4 месяцев. Если дискриминационная политика чипмейкера будет окончательно доказана, ему грозит штраф в размере 10% от годовой выручки по каждому обвинению. Также компании придёт-

ся изменить методы ведения бизнеса. По итогам 2015 финансового года, закрытого 27 сентября, Qualcomm выручила \$25,3 млрд.

В Qualcomm утверждают, что компания всегда работала в Европе с соблюдением местных антимонопольных законов, а «конкуренция на рынке чипов беспроводной связи остаётся сильной и динамично развивающейся».

Напомним, в феврале Qualcomm была оштрафована на \$1 млрд в Китае за подобное злоупотребление своим статусом одного из лидера отрасли.

Reuters